

Development of a decision support system for optimization of the performance of sailing yachts

Desarrollo de un sistema de apoyo a la decisión para optimizar el comportamiento de barcos de vela

Julio García-Espinosa¹, Inmaculada Ortigosa², Alberto Fernández³

¹ Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Edifici C1, C/ Gran Capità S/N (Campus Norte UPC), 08034 Barcelona, Spain
web: <http://www.cimne.upc.edu> - email: julio@cimne.upc.edu

² Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech (UPC)
Campus Nàutica, Edif. NT3, C. Escar 6-8, 08039 Barcelona, Spain

³ Totalmar Servicios Náuticos S.L.

C/ General Álvarez de Castro, 3 3º 2ª, 08003 Barcelona, Spain

ABSTRACT

In this paper, the conception and design of a new monitoring system for a racing yachts rig is presented. The sensors developed are able to process the measured strain data, by applying artificial neural networks (ANN) algorithms, and then evaluate the load acting on an element and identify the direction of the action of that force. This way, it is possible to identify the actual operating conditions of the yacht rig. The required data for ANN training is generated from the results obtained from different finite element method (FEM) computational models of the device. Furthermore, during the design phase of the system, different experimental campaigns were carried out. The experimental tests were designed to serve as proof of concept, as well as to validate the different procedures used in the system development and application. The developed monitoring system is wireless, low-intrusive and easily adaptable to any yacht configuration.

This work also presents the integration of the monitoring system into a coupled fluid-structure computation model for the sails and rig of a boat. The resulting system is an efficient tool for evaluating performance and decision support in the adjustment of a sailboat rig.

RESUMEN

En este artículo, se presenta la concepción y el diseño de un nuevo sistema de monitorización para la jarcia de veleros de competición. Los sensores desarrollados incluyen un sistema de procesamiento, basado en la aplicación de redes neuronales (ANN, por sus siglas en inglés) que es capaz de evaluar la carga que actúa sobre un elemento e identificar la dirección de acción de esa fuerza. De esta forma, es posible identificar las condiciones en las que opera la jarcia del yate en cada momento. Los datos requeridos para el entrenamiento de las redes neuronales se han generado a partir de una campaña de análisis estructurales del dispositivo mediante el método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés). Además, durante la fase de diseño del sistema se llevaron a cabo diferentes campañas experimentales. Estos experimentos fueron diseñados como prueba de concepto, así como para validar los diferentes procedimientos usados en el desarrollo y en la aplicación del sistema.

El sistema de monitorización desarrollado es inalámbrico, poco intrusivo y fácilmente adaptable a cualquier tipo de velero. Además, en este trabajo se presenta la integración del sistema con un modelo de cálculo acoplado fluido-estructura de las velas, jarcia y arboladura del velero, configurando una eficiente herramienta de soporte a la decisión para evaluar el comportamiento y optimizar el ajuste de la jarcia del yate.

Palabras clave: Método de los elementos finitos; Cálculo acoplado fluido-estructura; Redes neuronales; Redes de sensores inalámbricos; Velas; Jarcia; Monitorización estructural

1. Introducción

La necesidad de monitorizar estructuras no solo se encuentra en los diversos campos de la ingeniería, sino que también en deportes de competición se presentan exigencias similares. En estos casos, el sistema de monitorización permite conocer el estado de la estructura (vehículo, barco, etc.) para salvaguardar la seguridad y para mejorar su rendimiento, mediante el ajuste de diferentes parámetros de la operación.

Si nos referimos al caso de los veleros de competición, en las últimas décadas se han llevado a cabo grandes mejoras en el diseño, que han permitido aumentar de manera muy significativa el rendimiento de los barcos. En paralelo al aumento de su competitividad aparece una creciente demanda de investigación tanto experimental como computacional a fin de entender mejor el comportamiento de los veleros de competición y poder optimizar tanto su diseño como su uso.

Como ejemplo, durante la 33 edición de la Copa América, el equipo BMW Oracle Racing [1] registró datos a través de 250 sensores repartidos por todo el casco del trimarán ORA11, que resultó ganador de la regata. Con esta información, la tripulación pudo comparar las mejoras en el funcionamiento desde el primer día de navegación hasta el último. La disposición de los sensores en estos barcos se define en la fase de diseño y se deben instalar durante la construcción para integrarse en el casco, jarcia y velas. En las referencias [2,3,4] se encuentran ejemplos de aplicación de sensores de fibra óptica instalados en yates IACC. Además, se pueden encontrar muchas otras referencias en la literatura relacionadas con la aplicación de sistemas de sensores instalados en barcos [5,6] y explícitamente en las velas [7] a fin de monitorizar el funcionamiento del yate.

Si nos centramos en la jarcia de un velero, nos encontramos con una estructura de características muy especiales. La principal especificidad viene del hecho de que es una estructura completamente configurable de manera dinámica. Efectivamente, la tripulación del velero puede *trimar*, esto es, ajustar la jarcia a las diferentes condiciones de operación, de forma que la estructura opera muy cerca del límite en las diversas configuraciones de trabajo. Por esto, la monitorización de la jarcia del velero ha de tener en cuenta estas especificidades y esto justifica que a pesar de los avances en el desarrollo de sistemas de monitorización para veleros de competición, según el conocimiento de los autores, no existe aún ningún sistema flexible capaz de adaptarse

a cualquier diseño de jarcia que pueda ser usado para medir la respuesta estructural de los diferentes elementos y que sea capaz de identificar la configuración operativa en tiempo real.

En este artículo, se presentan la concepción y el diseño de un nuevo sistema de monitorización para la jarcia de veleros de competición. Los sensores desarrollados incluyen un sistema de procesamiento, basado en la aplicación de redes neuronales (ANN, por sus siglas en inglés), que es capaz de evaluar la carga que actúa sobre un elemento e identificar la dirección de acción de esa fuerza. De esta forma, es posible identificar las condiciones en las que opera la jarcia del yate en cada momento. Los datos requeridos para el entrenamiento de las redes neuronales se han generado a partir de una campaña de análisis estructurales del dispositivo mediante el método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés). Además, durante la fase de diseño del sistema, se llevaron a cabo diferentes campañas experimentales como prueba de concepto, así como para validar los diferentes procedimientos usados en el desarrollo y en la aplicación del sistema.

El guion de este artículo es el que sigue. En primer lugar, se hace el planteamiento del problema y seguidamente se presenta un primer concepto de sensor de arraigo, incluyendo la aplicación de redes neuronales en el proceso. Luego se muestran las características del diseño final del sistema de monitorización remoto para la jarcia. Finalmente, se introduce la herramienta computacional de análisis de interacción fluido-estructura para jarcia y arboladura de veleros, con la que se integra el sistema de sensores.

2. Planteamiento del problema

Como se comentó anteriormente, la jarcia de los veleros es una estructura con requerimientos muy especiales. La principal particularidad proviene del hecho de que es una estructura completamente configurable de manera dinámica. De hecho, la tripulación del velero puede actuar en lo que se denominan parámetros de trimado, para adaptar la estructura a las condiciones de operación. Algunos de estos parámetros de trimado se ajustan en puerto (como la tensión en los obenques y en los *stays*), pero el resto de parámetros se modifican dinámicamente durante la regata; se varía la posición del carro (*twist*) y se ajusta la tensión en las escotas (*camber*) con el fin de optimizar la operación de las velas (fig. 1).

Uno de los objetivos en este trabajo es el desarrollo de un sistema de monitorización estructural que sea poco intrusivo, flexible, inalámbrico y económico, para monitorizar la jarcia de los veleros. Este sistema consistirá en un mecanismo de sensores que adquirirán los datos de las condiciones estructurales, capaz de ser adaptado a cualquier barco, y un avanzado procesador de señal capaz de identificar los parámetros de trimado.

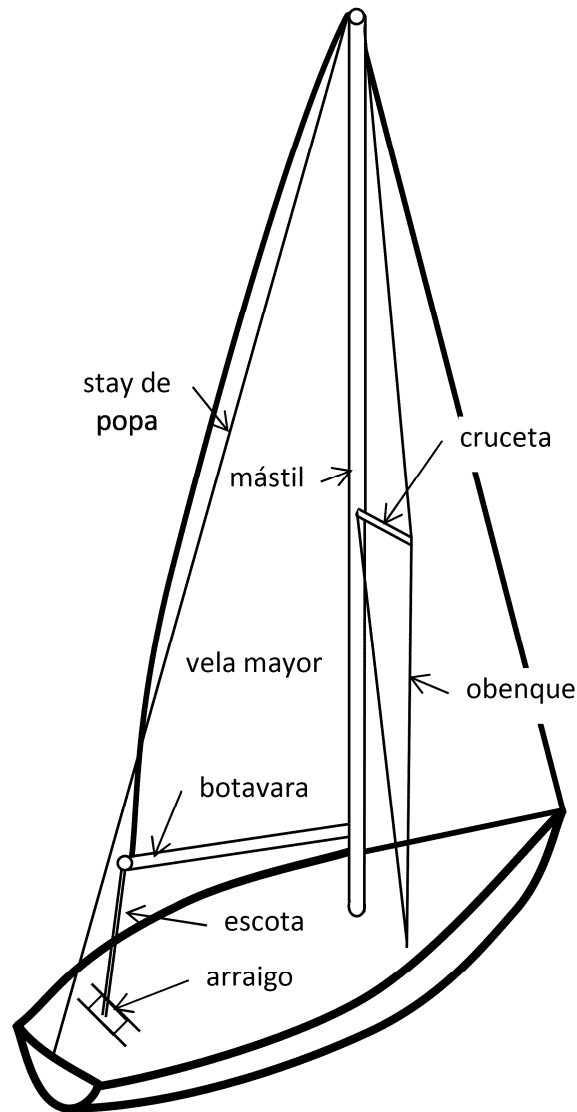


Figura 1. Nomenclatura básica del velero.

Muchos de los parámetros de trimado se pueden monitorizar utilizando técnicas estándar. Actualmente están disponibles en el mercado diversas células de carga para medir cargas en cuerdas y cables. No obstante, estas soluciones son intrusivas, ya que los sensores han de ir insertados en el cable, lo que entorpece la maniobrabilidad. Buscando una solución poco intrusiva, se pensó en instalar galgas extensiométricas en los arraigos a los que van amarrados las escotas y procesar los datos para calcular la carga que actúa en el cabo. La extensión directa de esta idea fue intentar obtener no solo la magnitud de las fuerzas sino también su dirección (ángulo) usando una aproximación similar.

Asumiendo que la carga de cualquier elemento está biunívocamente relacionada con el campo de deformaciones y caracterizando el campo de deformaciones por un conjunto de n medidas $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, podríamos escribir:

$$\{\vec{F}, \alpha, \beta\} = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) \quad (1)$$

donde \vec{F}, α, β son las fuerzas y direcciones que actúan sobre la cuerda unida a la polea. Hay muchas opciones para caracterizar experimentalmente la función f , pero probablemente una de las más extensamente usadas sean las redes neuronales.

2.1 Redes neuronales

Las redes neuronales (ANN) [8] son modelos computacionales inspirados en los aspectos neuronales de funcionamiento del cerebro humano. Una red neuronal es un procesador en paralelo formado por unidades de proceso simple (neuronas), las cuales son capaces de almacenar conocimientos de experiencia basándose en la interacción adaptativa entre las neuronas. Actualmente, las redes neuronales se consideran una estructura general muy buena para representar relaciones no lineales entre múltiples variables de salida y de entrada, donde la forma de la correlación está gobernada por unos parámetros que se ajustan. El proceso de ajuste de estos parámetros se denomina *aprendizaje* o *entrenamiento*. Generalmente, los modelos de redes neuronales representan funciones no lineales de muchas variables, mediante la superposición de funciones de una única variable, denominadas *funciones ocultas*. Las funciones ocultas se adaptan a los datos de entrada como parte del proceso de entrenamiento. Por tanto, las redes neuronales se consideran un aproximador universal de funciones continuas [9].

Las ANN ofrecen ventajas en la aproximación de funciones en espacios de múltiples dimensiones; el precio que hay que pagar por dichas ventajas es que el proceso de determinar el ajuste de las funciones ocultas es un problema de optimización no lineal, que es computacionalmente intensivo y posee un número adicional de complicaciones como la presencia de múltiples mínimos en las funciones de error.

El problema al que nos enfrentamos es complejo, ya que pretendemos desarrollar un sistema de monitorización flexible capaz de procesar los datos medidos en diferentes elementos estructurales de la jarcia. Es necesario decodificar la señal para determinar la configuración en la que se encuentra la estructura en cada momento. Además, es muy difícil o prácticamente imposible crear un modelo matemático preciso con este propósito. Aquí es donde las ANN toman gran importancia. En este trabajo se hace uso de una red neuronal formada por varias capas de perceptrones, a una de las capas se la denomina *capa oculta* y a los perceptrones que forman esta capa oculta se les denomina *neuronas* [9].

3. Prototipo de arraigo sensorizado

Una de las aplicaciones más directas de la idea planteada es la monitorización del carro de la mayor. En la jarcia de los veleros de competición típicos, la escota se amarra al carro mediante un arraigo. En el arraigo, la polea se fija al carro que desliza por una guía de banda a banda (fig. 2). El carro de la mayor permite controlar de manera independiente la dirección y la tensión del cabo amarrado a la polea, lo que permite al navegante colocar el carro en la posición más adecuada y adaptar la tensión de la escota a las condiciones de viento, consiguiendo así el trimado deseado en las velas.

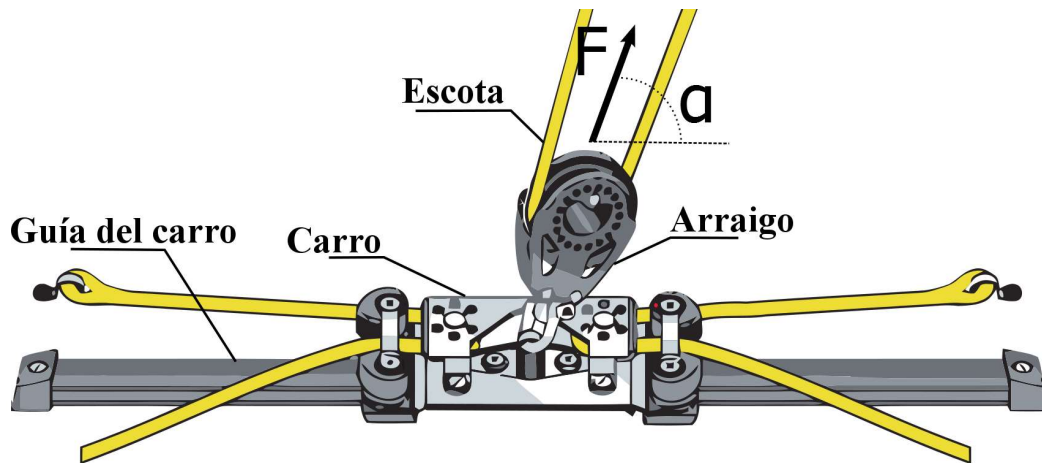


Figura 2. Esquema de un carro de mayor típico

Monitorizar de forma operativa la escota y, por tanto, el trimado de la vela mayor, requiere el conocimiento del ángulo entre el cabo y la guía del carro. Con este propósito se ha intentado desarrollar un arraigo con un sistema de monitorización integrado. El primer paso en el desarrollo del artefacto fue dirigido a la implementación del sistema de adquisición de datos. La opción seleccionada fue el sistema de adquisición de datos inalámbrico MicroStrain's V-Link. El sistema V-Link posee 7 canales de medida externos, siendo 4 canales de entrada diferenciales (canales de deformación) principalmente diseñados para galgas extensiométricas de 350 Ω o más de resistencia, y 3 canales de entrada (canales analógicos) diseñados para sensores de entre 0 y 3 voltios. La combinación de los 7 canales de medida es capaz de soportar un amplio rango de tipos de puente de Wheatstone y sensores, incluyendo galgas extensiométricas.

Figura 3. Plano del prototipo de arraigo sensorizado.

Las dimensiones de la electrónica y la necesidad de una batería externa que permitiera un mínimo de 24 horas de operación continua nos llevaron al diseño mostrado en la figura 4. Se denota que las dimensiones del elemento son probablemente demasiado grandes para su uso práctico, pero este se considera solo un prototipo para hacer las pruebas y evaluar la viabilidad del concepto.

3.1 Pruebas experimentales

Se llevaron a cabo pruebas experimentales con el prototipo desarrollado. Con este propósito, el arraigo se sensorizó con 8 galgas extensiométricas, distribuidas de manera que formaban dos puentes de Wheatstone completos. Cada puente de Wheatstone completo se colocó en uno de los lados del arraigo.

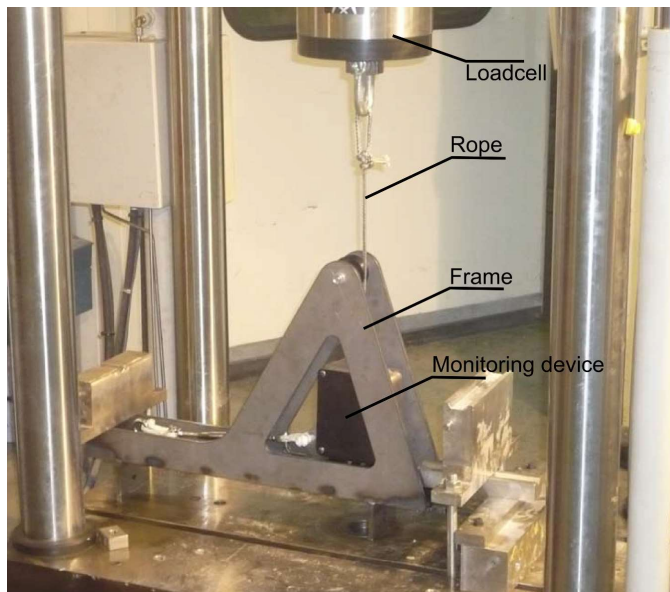


Figura 4. Disposición experimental del prototipo del arraigo.

Las pruebas se realizaron en una máquina de tracción Instron 8505 axial, con una célula de carga integrada Instron 2518-111, en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña. Se construyó una estructura auxiliar para soportar el arraigo y adaptarlo a la máquina a fin de poder variar el ángulo de tiro. En la figura 4 se muestra una imagen de la disposición experimental. En el fondo de la estructura se montó una guía en la que se enganchó el arraigo monitorizado.

Los ensayos consistieron en dos ciclos completos de carga de 0 a 5kN con incrementos de 0,25kN y se tomaron datos para ángulos de 0°, 13°, 29° y 33°. La figura 5 muestra los resultados obtenidos para 0° y 33°. Lamentablemente, la disposición experimental utilizada resultó inadecuada para los ensayos de tiro con ángulo. El carril usado para soportar el arraigo se deformaba de manera significativa en esas condiciones, provocando una variación espuria del ángulo efectivo de tiro y contaminando los resultados experimentales, tal y como se puede apreciar en la gráfica de la derecha de la figura 5.

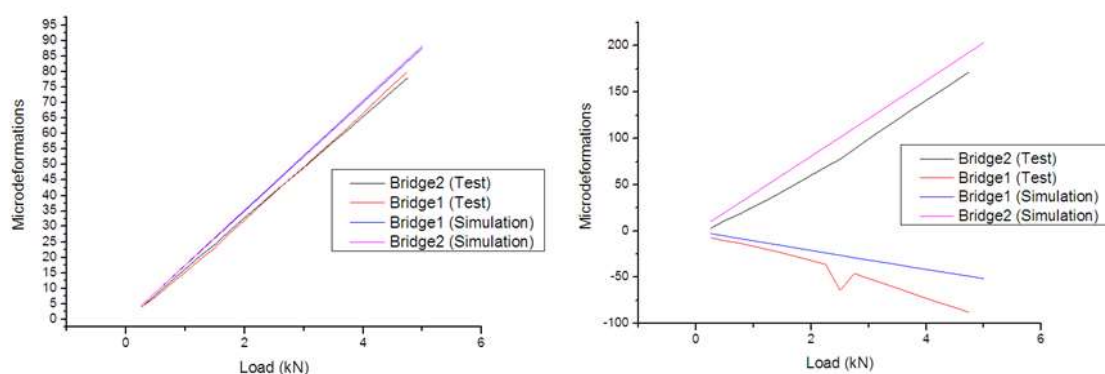


Figura 5. Resultados experimentales y numéricos de los ensayos de tracción a 0° (izquierda) y 33° (derecha).

También se llevaron a cabo experimentos adicionales con los nodos de adquisición inalámbrica V-Link. El objetivo era determinar la autonomía de la batería y la fiabilidad en general del sistema. Las pruebas mostraron que la vida de la batería interna (600 mAh de capacidad) para una tasa de adquisición de datos de 2000 muestras por segundo era de un máximo de dos horas. También se realizaron pruebas disminuyendo la tasa de adquisición de datos, a unas 10 muestras por segundo. Esta configuración resultó ser inviable para nuestro propósito ya que en ninguno de los casos se logró una autonomía superior a unas pocas horas.

3.2 Pruebas numéricas

En paralelo a los ensayos experimentales, el diseño se calculó computacionalmente con el *solver* de análisis estructural RamSeries [10], basado en el método de los elementos finitos (MEF). Se creó un modelo computacional como un sólido elástico lineal en 3D. Para simular correctamente el funcionamiento del arraigo, el modelo computacional se completó con las siguientes condiciones de contorno:

- En las superficies del arraigo que van fijadas al carro se restringieron los desplazamientos normales al carro.
- Los desplazamientos a lo largo de la guía están restringidos en las superficies del arraigo en contacto con la escota de babor y la escota de estribor.
- Se aplica una carga distribuida en la superficie en contacto con la escota, la cual une la botavara con el carro.

En el modelo computacional se han definido unas galgas extensiométricas virtuales, en las mismas posiciones en las que se colocaron en el ensayo experimental.

Con el modelo MEF se reprodujeron los mismos casos que se realizaron en el ensayo experimental. Algunos de los resultados se muestran en la figura 6.

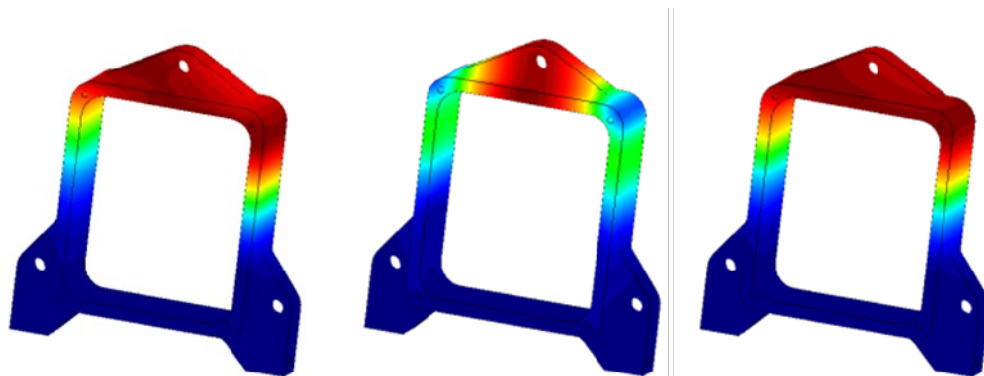


Figura 6. Resultados del campo de desplazamientos en el modelo MEF. De izquierda a derecha: carga 4,5 kN-29°, carga 2,25 kN-13° y 2,25 kN-0°.

Los resultados de desplazamientos que se dan en los vértices de las galgas virtuales del análisis computacional han sido utilizados para calcular el promedio de desplazamiento en las galgas extensiométricas. Los resultados obtenidos con las simulaciones se han comparado con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, y se muestran en la figura 6. Como puede verse, los resultados numéricos prácticamente coinciden con los obtenidos para 0°. Lamentablemente, los

problemas ya comentados con la disposición experimental impiden valorar la diferencia encontrada en otros casos.

Se aprecia una diferencia entre los resultados de las simulaciones y los resultados experimentales. Esta diferencia se atribuye a la imprecisión en la posición de las galgas durante los ensayos experimentales y a la simplificación de las condiciones de contorno definidas en el análisis MEF frente a las condiciones reales. Además, se han de mencionar las respuestas no lineales que se dan en los resultados experimentales para todos los ángulos, debidas a la deformación espuria del carro. A pesar de estas diferencias, el comportamiento de las galgas es bastante similar en los experimentos y en el análisis computacional, lo que prueba la validez del análisis computacional como generador de datos para entrenar la ANN.

3.3 Diseño de la ANN

En este apartado, se desarrollarán las ANN que permitan procesar las señales de las deformaciones del arraigo. Para la creación y optimización de la ANN se ha utilizado la herramienta libre Flood [11]. Esta herramienta es una completa librería de clases en C++ que permite implementar arquitecturas de perceptrón multicapa y que incluye esquemas de entrenamiento basados en el método de los gradientes conjugados.

La función que se ha de aproximar mediante las ANN es una función con dos variables de entrada (deformaciones $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, medidas en cada uno de los lados del arraigo) y dos salidas (carga y ángulo de tiro en la escota) $\{\vec{F}, \alpha, \beta\} = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$.

La estructura de ANN, aparte de las entradas y la salida, tiene una capa oculta de neuronas. El proceso de aprendizaje/validación se lleva a cabo variando el número de neuronas en la capa oculta. Se selecciona la arquitectura que ofrece un mejor ajuste a los valores de validación.

Para el entrenamiento y la validación de la ANN se han generado 320 casos obtenidos de análisis por el MEF, más 76 casos obtenidos en los ensayos experimentales. Para el entrenamiento de la ANN se seleccionaron de manera aleatoria el 80% de los datos de simulaciones más 46 datos experimentales. Los datos restantes se utilizaron para la validación.

El entrenamiento sirve para obtener los parámetros ocultos de la red neuronal y una vez ajustados esos parámetros se ejecuta la red neuronal con los valores de entrada de los datos reservados para la validación. Los resultados obtenidos se comparan con los disponibles. La comparación se hace mediante una regresión lineal, de manera que el ajuste ideal para la red neuronal sería aquel que resulte en una recta de regresión con pendiente unidad, término independiente nulo y coeficiente de correlación 1. Para decidir la arquitectura de red que mejor resultados daba se tomó como parámetro a optimizar el coeficiente de correlación.

Se probaron diferentes configuraciones de la red neuronal y la que ofreció una mejor aproximación fue la red neuronal con 4 neuronas en la capa oculta. La regresión obtenida con esta arquitectura era prácticamente perfecta, con un coeficiente de correlación de 0,996.

4. 3D Remote Rigging Monitor

Tras los satisfactorios resultados del desarrollo del prototipo, se trabajó en la concepción de un dispositivo modular y de dimensiones más reducidas que pudiera adaptarse a la monitorización de diferentes elementos de la jarcia.

Además, se consideró necesaria la mejora de la autonomía, hasta conseguir garantizar su operación durante varios días. Para ello, y después de evaluar diferentes alternativas, para la adquisición y transmisión de datos se seleccionó la plataforma Waspote, desarrollada por Libelium. Waspote es una plataforma basada en un micro controlador Atmel que puede ser programada usando una variante de Arduino [12]. Waspote tiene diferentes implementaciones comerciales, pero desafortunadamente no posee ningún soporte para galgas extensiométricas. Por tanto, este soporte ha tenido que ser desarrollado dentro de este trabajo, además de implementar estrategias de software para aumentar la vida máxima de la batería.

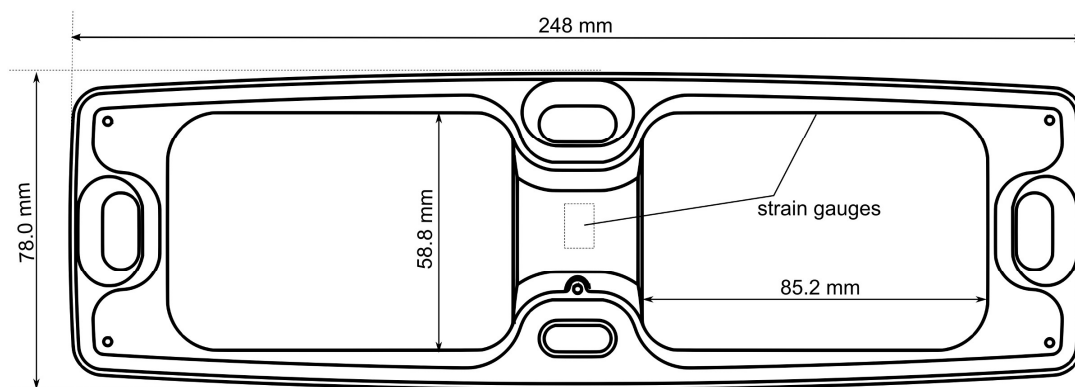


Figura 7. Diseño del 3D Remote Rigging Monitor.

Como resultado de este trabajo, se ha desarrollado un nuevo dispositivo de monitorización basado en la plataforma de adquisición de datos anteriormente descrita. En la figura 7 se muestra un plano esquemático de este dispositivo, al que se ha denominado 3D Remote Rigging Monitor (3DRRM). La principal ventaja de este diseño es que tiene dos modos de configuración: se puede utilizar como célula de carga para medir la carga en cualquier cuerda o cable y usando un adaptador, se puede acoplar al carro de la mayor, operando así como el anterior prototipo.

Las principales características de 3DRRM son:

- Peso: 650 gr.
- Dimensiones: 248,0 x 78,0 x 36,3 mm.
- Carga máxima de trabajo 2 Tm por diseño.
- Precisión 0,5 kg por diseño.
- Tasa de muestreo 10 Hz por diseño.
- Consumo de potencia baja (autonomía de varios días).
- Operación completamente inalámbrica (excepto mantenimiento).
- Dos modos de operación: medidas de fuerza o fuerza + ángulo.



Figura 8. Modos de configuración del 3D Remote Rigging Monitor.

Como se indica en la figura 7, en el elemento hay instalados dos puentes de Wheatstone completos formados por ocho galgas extensiométricas. Se han realizado diferentes pruebas para evaluar la operatividad de la herramienta y se ha comprobado el buen funcionamiento de la misma. En la figura 9 se muestra el desarrollo de las pruebas realizadas para las dos configuraciones de la herramienta.

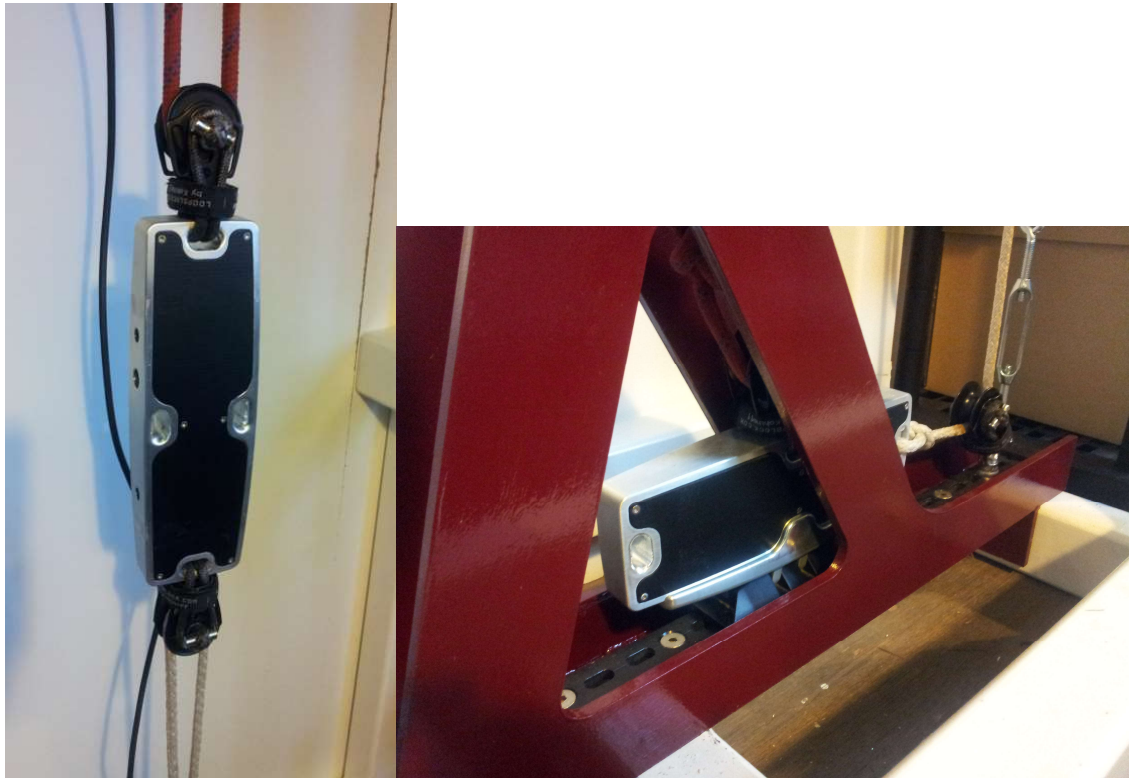


Figura 9. Desarrollo de los experimentos del 3DRRM (modos de configuración de la fuerza y el ángulo, a la izquierda, y de carga, a la derecha).

Como en el caso anterior, se desarrolló una red neuronal para el procesamiento de las señales de deformación del dispositivo. Para el ajuste de esas redes, se creó un modelo computacional MEF con el que se realizaron simulaciones para 50 casos distintos. Con estos datos se repitió el proceso anteriormente descrito para obtener la arquitectura óptima de red, que resultó ser la misma que en el caso anterior: cuatro neuronas en la capa oculta, con la que se obtuvieron coeficientes de regresión superiores a 0,99 en todos los casos. La ANN resultante se integró en una herramienta de software para adquisición de datos.

5. Integración con la herramienta de cálculo de la jarcia, arboladura y velas

La herramienta de monitorización desarrollada se ha integrado con un *solver* de interacción fluido-estructura para el análisis de la jarcia y la arboladura de veleros. Esta herramienta está basada en el acoplamiento de códigos de análisis aerodinámico y cálculo estructural, desarrollados en C++, específicamente para este trabajo.

5.1.1. Análisis aerodinámico

El código de análisis aerodinámico desarrollado se basa en la aplicación del método de entramado de vórtices (VLM, por sus siglas en inglés) [13,14], para la solución del problema de flujo potencial estacionario alrededor de las velas. Este método es rápido y adecuado para calcular el flujo alrededor de superficies finas sustentantes muy curvadas, como las velas. En este trabajo, las velas se discretizan con elementos cuadriláteros que forman anillos de vorticidad constante. El punto de colocación de cada elemento se localiza en el centro geométrico del elemento. La velocidad inducida

por el i -ésimo anillo de vórtices, \vec{V}^i , se calcula haciendo uso de la ley de Biot-Savart, según la cual cada lado del cuadrilátero genera en el punto $\vec{r}_0 = (x, y, z)$ una velocidad dada por:

$$\vec{V}_{1,2}^i = \frac{1}{4\pi} \frac{\vec{r}_1 \times \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2|^2} \vec{r}_0 \cdot \left(\frac{\vec{r}_1}{r_1} - \frac{\vec{r}_2}{r_2} \right) \quad (2)$$

donde \vec{r}_1, \vec{r}_2 son los radiovectores de los nodos del lado correspondiente. De esta forma, la velocidad inducida por el anillo de vórtices es:

$$\vec{V}^i = \vec{V}_{1,2}^i + \vec{V}_{2,3}^i + \vec{V}_{3,4}^i + \vec{V}_{4,1}^i \quad (3)$$

En cada punto de control de la superficie de la vela se impone la condición de contorno de velocidad normal nula a la superficie.

$$(\vec{V} + \vec{V}_\infty) \cdot \vec{n} = 0 \quad (4)$$

donde \vec{V} es la suma de las velocidades inducidas en el punto de control y \vec{V}_∞ es la velocidad de flujo libre.

A partir de las fórmulas anteriores, se evalúan los coeficientes de influencia a_{ij} de cada elemento i en el punto de colocación j :

$$a_{ij} = \vec{V}^i \cdot \vec{n}_j = 0 \quad (5)$$

de forma que el sistema de ecuaciones que se resuelve es:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \vdots \\ \Gamma_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} \quad (6)$$

donde las componentes del vector de términos independientes están dadas por $b_j = -\vec{V}_\infty \cdot \vec{n}_j$.

En este trabajo, el sistema anterior se resuelve usando el método de gradientes biconjugados preconditionado, obteniéndose la circulación de cada elemento de vórtice a partir de la cual pueden calcular las velocidades totales de flujo sobre la vela. Estas se descomponen en las componentes paralelas a la superficie de la vela (u_m, u_l) y ($u_{m,\infty}, u_{l,\infty}$) a partir de las cuales se evalúan las velocidades en cada cara de la vela.

$$\begin{aligned} \vec{V}_{up} &= \left(u_{m,\infty} + u_m + \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial m}, u_{l,\infty} + u_l + \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial l}, 0 \right) \\ \vec{V}_{down} &= \left(u_{m,\infty} + u_m - \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial m}, u_{l,\infty} + u_l - \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial l}, 0 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

donde los términos $\frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial m}$ y $\frac{\partial \Delta \Gamma}{\partial l}$ se estiman mediante diferenciación numérica sobre el elemento. Finalmente, con las velocidades en cada uno de los lados de la vela se estiman las correspondientes presiones mediante:

$$\begin{aligned} p_{up} &= p_\infty - \frac{1}{2} (V_{up}^2 - V_\infty^2) \\ p_{down} &= p_\infty - \frac{1}{2} (V_{down}^2 - V_\infty^2) \end{aligned} \quad (8)$$

El método desarrollado, junto con diferentes casos de validación, se presenta con detalle en [19].

5.1.2. Análisis estructural

El código desarrollado para el análisis estructural de jarcia, arboladura y velas se basa en la aplicación del FEM, utilizando diferentes tipologías de elemento.

Las velas son estructuras muy delgadas y sufren deformaciones muy pequeñas. Por ello, puede asumirse una relación lineal entre las deformaciones del material y las tensiones aplicadas. Teniendo en cuenta la baja resistencia a flexión de estas estructuras, se ha elegido modelar las velas como elementos tipo membrana. Se han utilizado elementos triangulares de tres nodos con tres grados de libertad de desplazamiento por nodo [15].

La jarcia del barco consta de diferentes cabos y cables, elementos que solo transmiten esfuerzos axiales de tracción. En este trabajo se asume que estos elementos trabajan dentro del régimen elástico y que su condición de operación está definida por una tensión en los extremos, que se impone como condición de contorno. Estas tensiones vendrán dadas por el sistema de monitorización integrado en la jarcia del velero. Teniendo en cuenta estas consideraciones, la discretización de los cables se ha realizado mediante elementos lineales tipo cable, de dos nodos con tres grados de libertad de desplazamiento en cada uno de los nodos, considerando el material homogéneo e isotrópico.

Imponiendo una tensión constante en cada elemento y considerando la relación lineal tensión-deformación, se puede calcular fácilmente la energía potencial de deformación y su gradiente [16].

Los elementos estructurales de la arboladura son capaces de transmitir esfuerzos axiales, cortantes y flectores, por lo que se han discretizado mediante elementos lineales de barra de dos nodos con seis grados de libertad por nodo [17].

Como la botavara puede rotar alrededor del mástil, se ha considerado que el punto de nodo de unión entre estos dos elementos estructurales trabaja como una bisagra. A fin de introducir la capacidad de poder liberar un grado de libertad, se ha introducido el algoritmo [18] para condensar la matriz de rigidez y simular así la bisagra entre la botavara y el mástil.

El algoritmo utilizado para la resolución del problema estructural utiliza una descripción *lagrangiana* completa, de manera que la posición de todos los nodos de la estructura se actualizan en cada iteración para reproducir la no linealidad geométrica del problema.

5.1.3. Interacción fluido-estructura

La naturaleza del algoritmo de interacción fluido-estructura que se ha desarrollado es iterativa: comenzando por una geometría inicial de la estructura, se calculan las fuerzas que el flujo ejerce sobre las velas, utilizando las relaciones dadas en (8). A partir de esas fuerzas, se calculan los desplazamientos de la estructura, cuya geometría se actualiza *lagrangianamente*. Así, se calcula el nuevo flujo para la estructura actualizada, y el proceso se repite hasta que se obtiene la convergencia. El criterio de convergencia es que la máxima diferencia nodal relativa en fuerzas entre dos iteraciones sucesivas sea inferior a una tolerancia dada.

5.2. Integración del *solver* y el sistema de monitorización

En la selección de los métodos utilizados tanto para el análisis aerodinámico como para el estructural se ha primado la rapidez de cálculo frente a la exactitud, pero diferentes validaciones realizadas han demostrado que pueden ofrecer una buena aproximación a pesar de su relativa sencillez [19].

La interfaz de usuario para la herramienta se ha desarrollado utilizando el pre/postprocesador GiD [20]. De esta forma, se puede insertar fácilmente el modelo de cálculo y definir los datos necesarios para el análisis.

El *solver* interactúa con el sistema de monitorización desarrollado mediante una interfaz de comunicación TCL [21] que usa protocolo WIFI. De esta forma, el modelo de cálculo puede leer en tiempo real la información de los diferentes elementos de monitorización (tensiones en las escotas y cabos y ángulos en las escotas) y procesar la información para actualizar dinámicamente las condiciones de contorno del análisis computacional.

El *solver* de interacción fluido-estructura ha sido pensado para dar una respuesta precisa en solo unos segundos, por lo que la herramienta integrada se puede utilizar en tiempo real para evaluar el comportamiento del barco y el estado de los diferentes elementos monitorizados de la jarcia. El patrón puede utilizar esta herramienta durante la regata como una herramienta de apoyo a la decisión en tiempo real.

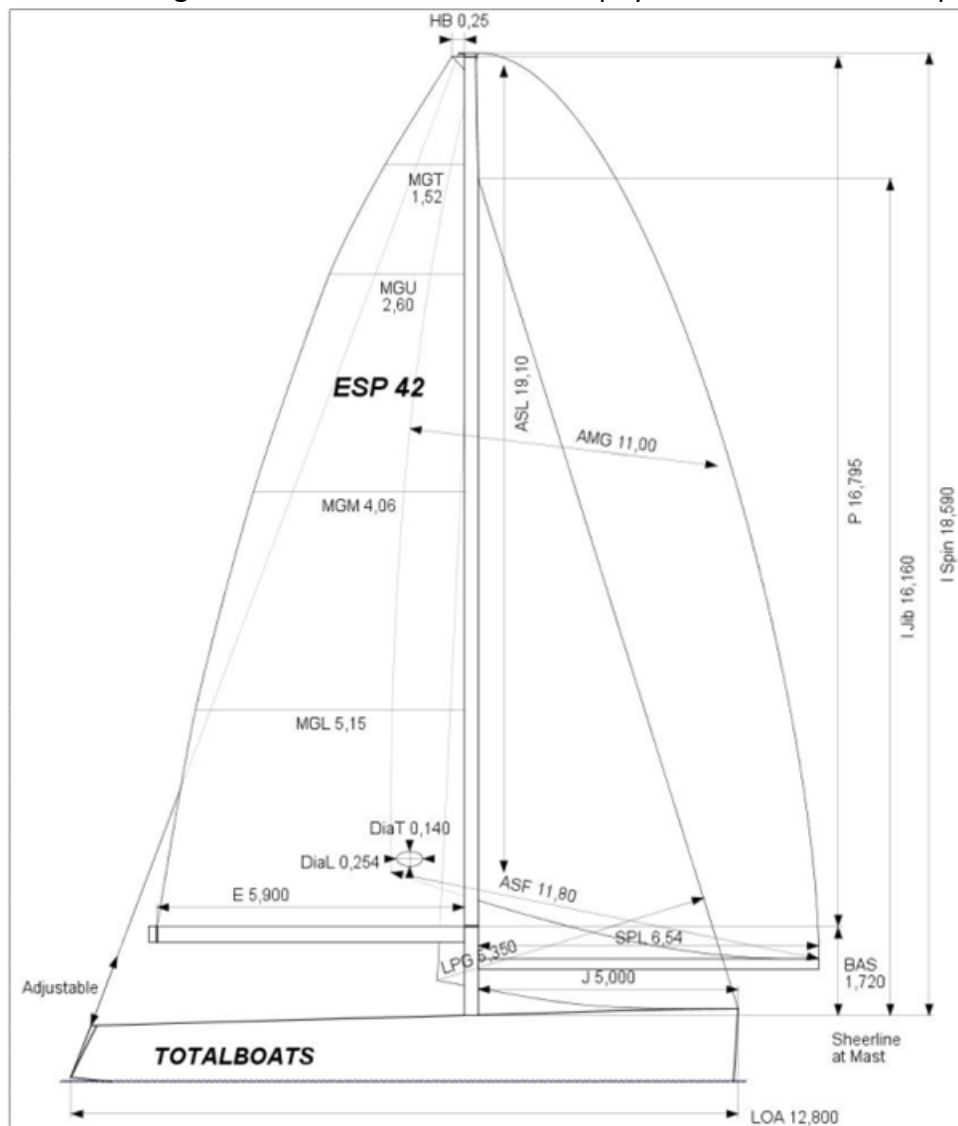


Figura 10. Plano vélico del velero Totalboats GP42.

Como demostración de la herramienta, se muestra un ejemplo de aplicación al velero de competición Totalboats GP42 (figura 10). Este barco fue diseñado en 2007 por Totalmar.

La jarcia se ha configurado inicialmente a partir de las siguientes cargas: obenques 15000 N, *stay* de popa 1200 N, *stay* de proa 22000 N, puño de la mayor 2000 N y puño del foque 1000 N. Las posiciones del carro de la mayor y del carro del foque son 0,63 m y 1,09 m desde el eje de crujía.

La figura 11 muestra algunos resultados de la herramienta computacional obtenidos para una intensidad de viento aparente de 10 m/s y 20º.

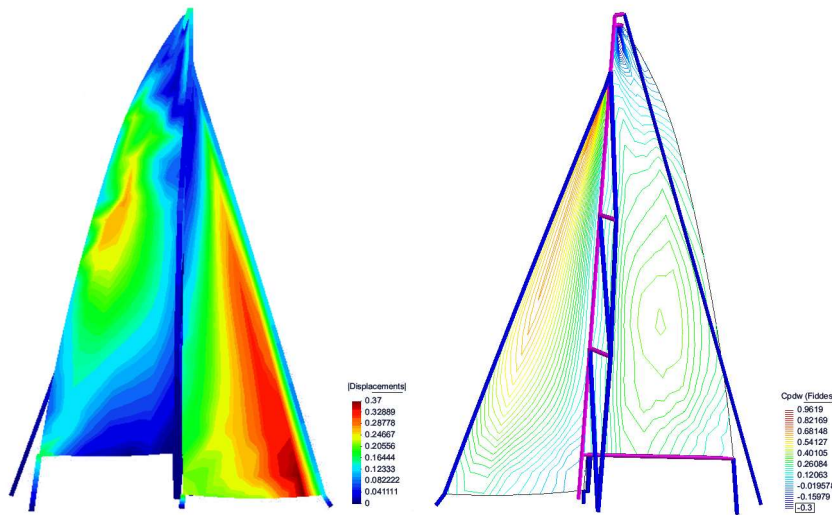


Figura 11. Resultados de los análisis computacionales del velero Totalmar GP42 (izquierda: desplazamientos; derecha: coeficiente de presión).

6. Conclusiones

En este trabajo se han llevado a cabo la concepción y el diseño de un nuevo sistema de monitorización para la jarcia de veleros de competición. Los sensores desarrollados incluyen un sistema de procesamiento basado en la aplicación de redes neuronales que es capaz de evaluar la carga que actúa sobre un elemento e identificar la dirección de acción de esa fuerza. De esta forma, es posible identificar las condiciones en las que opera la jarcia del yate en cada momento. Los datos requeridos para el entrenamiento de las redes neuronales se han generado a partir de una campaña de análisis estructurales del dispositivo mediante el método de los elementos finitos. Además, durante la fase de diseño del sistema, se llevaron a cabo diferentes campañas experimentales que han permitido validar los diferentes procedimientos usados en el desarrollo y la aplicación del sistema.

El sistema de monitorización resultante se ha integrado con una herramienta de cálculo acoplado fluido-estructura, capaz de calcular en tiempo real el comportamiento de la jarcia, la arboladura y las velas de la embarcación para la configuración de operación dada. El patrón puede utilizar esta herramienta durante la regata como una herramienta de apoyo a la decisión.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Industria de España en el proyecto DSSAIL TSI-020100-2008-647. Este proyecto de investigación ha sido promovido por Totalmar, Compass IS, la Facultad de Náutica de Barcelona y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

Los autores quieren también agradecer el apoyo y la colaboración en el desarrollo del trabajo de Juan Miguel Boned, Francesc Campà, Clara García, Jordi Jiménez, Albert Montserrat y Alberto Tena.

REFERENCIAS

- [1] ORACLE Web [on-line] <http://www.oracle.com/us/corporate/newsletter/database-insider/apr-10-bmw-184175.html>.
- [2] Murayama H., Kageyama, K., Nasure, H., Shimada, A. and Uzawa, K. Application of Fiber-Optic Distributed Sensors to Health Monitoring for full-scale composite structures, *Journal of Intelligent Material System and Structures*. 14 (2003) 3-13.
- [3] Shimada, A., Naruse, H., Uzawa, K. Kimura, G, Murayama, H. and Kageyama, K. Damage Detection for International America's Cup Class Yachts Using a Fiber Optic Distributed Strain Sensor, *Proc. Smart Structures and Materials*. 3986(2000) 312-323.
- [4] Vendittozzi, C. Application of an FBG sensors system for structural health monitoring and high performance trimming on racing yacht, *Fifth International Conference on Sensing Technology (ICST)*, Rome, Italy (2011).
- [5] Augier, B., Bot, P. and Hauville, F. Experimental full scale study on yacht sails and rig under unsteady sailing conditions and comparison to fluid structure interaction unsteady models, *The 20th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis, Maryland (USA) (2011).
- [6] Rizzo, C. M., Paci, M. and Carrera, G., Structural monitoring of mast and rigging of sail ships. Analysis and design of marine structures, in: C. Guedes Soares and P. K. Das (Eds.) CRC Press, London, 2009, pp.333-343.
- [7] Rossetti A., Codeluppi, R., Golfarelli, A., Zagnoni, M., Talamelli, A. and Tartagni, M. Design and characterization of polymeric pressure sensors for wireless wind sail monitoring, *Sensors and Actuators*, 167 (2011) 162-170.
- [8] Haykin, S. *Neural Networks – A Comprehensive Foundation*, 2nd ed., Prentice-Hall Inc., U.S.A., 1999.
- [9] Cybenko., G. Approximations by superpositions of sigmoidal functions, *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2 (4) (1989), 303-314.
- [10] Ramseries Website [on line]
<http://www.compassis.com/compass/en/Productos/RamSeries>
- [11] López R. (2008) Flood 2 User's Guide [on-line] <http://www.cimne.com/flood>
- [12] Arduino Web [on-line] <http://www.arduino.cc>
- [13] Fiddes, S., Gaydon, J. A new vortex lattice method for calculating the flow past yacht sails, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 63(1-3) (1996) 35-60.
- [14] Katz J. and Plotkin A. *Low-Speed Aerodynamics*, Cambridge University Press, New York, 2006.
- [15] Arcaro V., A simple procedure for shape finding and analysis of fabric structures, UNICAMP/FEC, 2004. [on-line] <http://www.arcaro.org/tension/main.htm>

- [16] Arcaro, V., A simple procedure for analysis of cable network structures. UNICAMP/FEC, 2004. Web. <http://www.arcaro.org/tension/main.htm>. Accessed 2010.
- [17] Oñate, E., Introduction to the finite element methods for structural analysis. Linear static, Springer and CIMNE, Barcelona, 2009.
- [18] Cook, R., Finite Element Modeling for Stress Analysis, John Wiley and Sons, New York, 1995.
- [19] Ortigosa, I. Development of a decision support system for the design and adjustment of sailboat rigging. Ph.D. Dissertation, Universidad Polit cnica de Cataluña, Barcelona, Spain, 2012.
- [20] GiD Website [on-line] <http://gid.cimne.upc.es>
- [21] Tcl (Tool Command Language) [on-line] <http://www.tcl.tk>